东海低渗储层压裂高起裂压力规律分析

张滨海[1],张朝举[2],陈峥嵘[1],孔祥伟[3]

(1. 中海油研究总院有限责任公司,100028 北京;2 中石化西南石油工程有限公司,610000 成都;
3. 长江大学石油工程学院,430000 武汉)

摘　要:东海 HY-A1 井 H8b 气藏为异常高温、高压地层,压裂设计的预测起裂压力与压裂施工不一致,作业中出现高起裂现象;考虑裂缝内流体压力、主应力、井壁渗透率、裂缝倾角等因素,建立了东海低渗储层压裂高起裂压力数学模型;通过现场验证,起裂压力计算误差为 4.9%,具有一致性。借助二分法对模型求解,结果表明,随井斜角度的增大,当方位角 <45°时,起裂压力变化随井斜角的增大并不明显,当方位角 ≥45°时,起裂压力呈现先减小后增大的趋势;随方位角的增大起裂角呈现先增大后减小,直至为零,起裂压力总体呈现先减小后增大的趋势;随着方位角增大,起裂压力存在最低峰值,最低峰值区间的方位角在 50° ~80°之间;井斜角 $\alpha=0°$ 直井段时,方位角 $\varphi=71°$ 时,最低起裂压力峰值为 58.5 MPa,在东海本区块属于高起裂;在一定的方位角度上起裂角存在最大峰值,起裂角最大峰值区间的方位角在 60° ~80°之间;应力差值大、泊松比小、异常高压是高起裂压力的关键因素;在压裂设计中,满足施工需求同时,尽可能设计方位角及井斜角靠近起裂压力最小区域。

关键词:东海低渗储层;起裂压力;起裂角;弹性模量;水平主应力;压裂

中图分类号:TE24　　　　**文献标志码:**A

Analysis of high fracturing initiation pressure in low permeability reservoirs in the East China Sea

ZHANG Binhai[1],ZHANG Chaoju[2],CHEN Zhengrong[1],KONG Xiangwei[3]

(1. CNOOC Research Institute Co. ,Ltd. ,100028 Beijing,China;
2. Sinopec Southwest Petroleum Engineering Co. ,Ltd,610000 Chengdu,China;
3. Petroleum Engineering College,Yangtze University,430000 Wuhan,China)

Abstract: H8b gas reservoir of well hy-A1 in the East China Sea has an abnormally high temperature and high pressure formation. The predicted fracture initiation pressure of fracturing design is inconsistent with that of fracturing operation,resulting in high fracture initiation in operation. In this paper,the mathematical model of high fracture initiation pressure of low permeability reservoir in the East China Sea is established by considering the factors of fluid pressure in fracture,including principal stress,wellbore permeability,

收稿日期:2021-03-10　　　**修回日期:**2022-01-15
基金项目:国家重大专项课题(No. CRI2019RCPS0039NSN)
通信作者:孔祥伟,博士,副教授。E-mail:76922591@ qq. com
引用格式:张滨海,张朝举,陈峥嵘,等. 东海低渗储层压裂高起裂压力规律分析[J]. 应用力学学报,2022,39(2):403-408.
ZHANG Binhai,ZHANG Chaoju,CHEN Zhengrong,et al. Analysis of high fracturing initiation pressure in low permeability reservoirs in the East China Sea[J]. Chinese journal of applied mechanics,2022,39(2):403-408.

and fracture dip angle. On-the-spot verification showed that the difference was 4.9%. With the help of dichotomy, the model is solved, and the results show that with the increase of well deviation, the fracture initiation angle decreases; with the increase of azimuth, the fracture initiation angle increases first and then decreases until zero, and the fracture initiation pressure generally decreases first and then increases; with the increase of azimuth, the fracture initiation pressure has the lowest peak value, and the azimuth of the lowest peak value range is between 50° and 80°. When the azimuth angle is 71° in 0° vertical well section, the peak value of minimum initiation pressure is 58.5 MPa; there is a maximum initiation angle in a certain azimuth angle, and the azimuth angle between the maximum initiation angle and the peak value is between 60° and 80°. Large stress difference, small Poisson's ratio and abnormal high pressure are the key factors of high initiation pressure. In fracturing design, the azimuth angle and deviation angle should be as close to the minimum force area of initiation pressure as possible.

Key words: low permeability reservoir in the East China Sea; fracture initiation pressure; fracture initiation angle; elastic modulus; horizontal principal stress; fracturing

大量的工程施工实践发现,天然气、石油、煤层气等化石能源的开采与岩石内部微裂隙的存在与扩展息息相关,裂缝内部网络发育程度越高,越有益于石油天然气等化石资源的开发[1-4]。压裂作业是沟通地层油气通道的重要手段,因此,研究岩石断裂阻力、起裂压力及裂缝扩展失稳过程,对油气井工程和岩体工程设计与施工具有重大的现实意义。

在压裂施工作业时,井壁周围岩石的实际受力状态是非常复杂的,外部作用有原地应力[5-8],岩石内部存在孔隙压力,由于压差作用,压裂液向地层渗滤引起附加应力,加之井筒压裂液的排量、密度等施工参数对地层原始孔隙压力也产生影响,使压裂作业过程中起裂压力计算尤为复杂[9-11]。

前人对起裂压力及起裂角开展了较多研究[12-15],没有考虑裂缝倾角,不能很好结合泵压、排量等参数计算分析起裂压力,本研究结合不同井斜角、方位角等条件,考虑井壁渗透率等条件,建立了东海低渗储层起裂数学模型,揭示了东海低渗储层井斜角、方位角对起裂角及起裂压力的影响,可为优化目标区块裂缝施工工艺参数提供帮助。

1　数学模型

假设低渗储层岩体是均匀各向同性、处于线弹性状态的多孔材料,并认为井眼周围的岩石处于平面应变状态,井眼处的地应力分量可以由原地应力表示为

$$
\begin{aligned}
\sigma_{xx} &= \sigma_H\cos^2\alpha\cos^2\beta + \sigma_h\cos^2\alpha\sin^2\beta + \sigma_v\sin^2\alpha,\\
\sigma_{yy} &= \sigma_H\sin^2\beta + \sigma_h\cos^2\beta,\\
\sigma_{zz} &= \sigma_H\sin^2\alpha\cos^2\beta + \sigma_h\sin^2\alpha\sin^2\beta + \sigma_v\cos^2\alpha,\\
\sigma_{xy} &= -\sigma_H\cos\alpha\cos\beta\sin\beta + \sigma_h\cos\alpha\cos\beta\sin\beta,\\
\sigma_{xz} &= \sigma_H\cos\alpha\sin\alpha\cos^2\beta + \sigma_h\cos\alpha\sin\alpha\sin^2\beta - \sigma_v\cos\alpha\sin\alpha,\\
\sigma_{yz} &= -\sigma_H\sin\alpha\cos\beta\sin\beta + \sigma_h\sin\alpha\cos\beta\sin\beta
\end{aligned}
\tag{1}
$$

式中:σ_v 为垂向应力;σ_H 为水平最大地应力;σ_h 为水平最小地应力;σ_{xx}、σ_{yy}、σ_{xy}、σ_{xz}、σ_{yz} 和 σ_{zz} 为笛卡尔坐标中的应力分量;α 为井斜角(井眼轴线与垂向的夹角);β 为相对于最大水平地应力的井斜方位。

井壁上的总应力可由井筒压力、地应力分量和压裂液渗流效应引起的井周应力叠加得出(规定拉应力符号为正,压应力符号为负),井周总应力为

$$
\begin{aligned}
\sigma_r^{\circ} = {} & \frac{R^2}{r^2}P + \frac{(\sigma_{xx}+\sigma_{yy})}{2}\left(1-\frac{R^2}{r^2}\right) + \\
& \frac{(\sigma_{xx}-\sigma_{yy})}{2}\left(1+\frac{3R^4}{r^4}-\frac{4R^2}{r^2}\right)\cos 2\theta + \\
& \sigma_{xy}\left(1+\frac{3R^4}{r^4}-\frac{4R^2}{r^2}\right)\sin 2\theta + \\
& \delta\left[\frac{\zeta(1-2\nu)}{2(1-\nu)}\left(1-\frac{R^2}{r^2}\right)-\varphi\right]P_n(r)
\end{aligned}
\tag{2}
$$

式中:σ_r° 为柱坐标中的应力分量;θ 为井周角(相对于 x 轴);r 和 R 分别套管的内径和外径;ζ 为有效应力系数;ν 为泊松比;P 为地层原始孔隙压力;井壁不可以渗透时 $\delta=0$,井壁可以渗透时 $\delta=1$;φ 为孔隙

度；$P_n(r)$ 为距离 r 处井筒压力。

$$\sigma_\theta^o = -\frac{R^2}{r^2}P + \frac{(\sigma_{xx}+\sigma_{yy})}{2}\left(1+\frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{(\sigma_{xx}-\sigma_{yy})}{2}\left(1+\frac{3R^4}{r^4}\right)\cos 2\theta - \sigma_{xy}\left(1+\frac{3R^4}{r^4}\right)\sin 2\theta + \delta\left[\frac{\zeta(1-2\nu)}{2(1-\nu)}\left(1+\frac{R^2}{r^2}\right)-\varphi\right]P_n(r) \quad (3)$$

式中 σ_θ^o 为柱坐标中的应力分量。

$$\sigma_z^o = \sigma_{zz} - \nu\left[2(\sigma_{xx}-\sigma_{yy})\left(\frac{R}{r}\right)^2\cos 2\theta + 4\sigma_{xy}\left(\frac{R}{r}\right)^2\sin 2\theta\right] + \delta\left[\frac{\zeta(1-2\nu)}{1-\nu}-\varphi\right]P_n(r) \quad (4)$$

式中 σ_z^o 为柱坐标中的应力分量。

$$\begin{cases}\sigma_{r\theta}^o = \dfrac{(\sigma_{yy}-\sigma_{xx})}{2}\left(1-\dfrac{3R^4}{r^4}+\dfrac{2R^2}{r^2}\right)\sin 2\theta + \sigma_{xy}\left(1-\dfrac{3R^4}{r^4}+\dfrac{2R^2}{r^2}\right)\cos 2\theta, \\ \sigma_{\theta z}^o = \sigma_{yz}\left(1+\dfrac{R^2}{r^2}\right)\cos\theta - \sigma_{xz}\left(1+\dfrac{R^2}{r^2}\right)\sin\theta, \\ \sigma_{rz}^o = \sigma_{xz}\left(1-\dfrac{R^2}{r^2}\right)\cos\theta + \sigma_{yz}\left(1-\dfrac{R^2}{r^2}\right)\sin\theta\end{cases} \quad (5)$$

式中：σ_θ^o、σ_z^o、$\sigma_{r\theta}^o$、$\sigma_{\theta z}^o$ 和 σ_{rz}^o 为柱坐标中的应力分量。

根据裂缝起裂准则，当储层裂缝壁切平面上的最大有效拉伸应力达到岩石的抗拉强度 σ_t 时，岩石起裂，即

$$(\sigma_\theta)_{max} = \sigma_t \quad (6)$$

式中：σ_t 为岩石的抗拉强度；$(\sigma_\theta)_{max}$ 为起裂最大有效拉伸应力，其所对应的起裂角为 $\theta=\theta_1$。

2 模型求解

根据应力分析，与 z 轴（σ_z' 方向）成 γ' 角斜平面上的正应力 σ 和 τ 与各应力分量间的关系为

$$\begin{cases}\sigma = \sigma_{\theta'}\cos^2\gamma' + 2\sigma_{\theta' z}\cos\gamma'\sin\gamma' + \sigma_z'\sin^2\gamma' \\ \tau = \dfrac{1}{2}(\sigma_z' - \sigma_{\theta'}')\sin 2\gamma' + \sigma_{\theta' z}'\cos 2\gamma'\end{cases} \quad (7)$$

为了求主应力，令

$$\frac{d\sigma}{d\gamma'} = 0 \quad (8)$$

可得到相互间差 90°的两个角，即

$$\begin{cases}\gamma_1' = \dfrac{1}{2}\arctan\dfrac{2\sigma_{\theta' z}'}{\sigma_{\theta'}' - \sigma_z'} \\ \gamma_2' = \dfrac{\pi}{2} + \dfrac{1}{2}\arctan\dfrac{2\sigma_{\theta' z}'}{\sigma_{\theta'}' - \sigma_z'}\end{cases} \quad (9)$$

式中：起裂角 γ_1'、γ_2' 分别对应于在 z-θ' 平面上除 σ_r' 之外的其余两个主应力的方向，其中之一便是产生最大拉应力的方向。为了确定最大拉伸应力的方向，确定最大拉应力的极值函数，即

$$\sigma_{max}(\gamma') = \frac{1}{2}(\sigma_{\theta'}' + \sigma_z') + \frac{1}{2}(\sigma_{\theta'}' - \sigma_z')\cos\gamma' + \sigma_{\theta z}'\sin 2\gamma' \quad (10)$$

对式（10）求二阶导数，即

$$F(\gamma') = \sigma''_{max}(\gamma') = -2(\sigma_{\theta'}' - \sigma_z')\cos 2\gamma' - 4\sigma_{\theta_z'}'\cdot\sin 2\gamma' \quad (11)$$

由于 $F(\gamma_1')$、$F(\gamma_2')$ 符号相反，根据函数极值定义，与 $F>0$ 相对应的 γ' 就是裂缝起裂角的真实值。把 γ_1' 和 γ_2' 代入上式，便可得到欲求的两个主应力值（设为 σ_1' 和 σ_2'）。由此，可求得套管井孔壁上的 3 个主应力为

$$\begin{cases}\sigma_1' = \sigma_r' \\ \sigma_2' = \dfrac{\sigma_z' + \sigma_{\theta'}'}{2} + \sqrt{\left(\dfrac{\sigma_z' - \sigma_{\theta'}'}{2}\right)^2 + \sigma_{\theta' z}'^2} \\ \sigma_3' = \dfrac{\sigma_z' + \sigma_{\theta'}'}{2} - \sqrt{\left(\dfrac{\sigma_z' - \sigma_{\theta'}'}{2}\right)^2 + \sigma_{\theta' z}'^2}\end{cases} \quad (12)$$

计算任意 θ' 下的 3 个主应力，使最大有效应力与抗拉强度相等，即可求出起裂压力。

当井壁为不渗透时

$$\begin{cases}\sigma'(\theta') - \alpha P_0 = S_t & \text{（井壁不渗透）} \\ \sigma'(\theta') - \alpha P = S_t & \text{（井壁渗透）}\end{cases} \quad (13)$$

令

$$\frac{d\sigma'(\theta')}{d\theta'} = 0, \left.\frac{d^2\sigma'(\theta')}{d\theta'^2}\right|_{\theta'=\theta_1'} < 0 \quad (14)$$

解方程可以求得 θ' 的值。将其代入方程，即可求得最大的周向应力 $\sigma'(\theta')_{max}$，可以判定裂缝是否发生起裂。方程采用二分法求解，通过不断地把函数 $f(x)$ 的零点所在的区间一分为二，使区间的两个端点逐步逼近零点。

图 1 ~ 图 2 分别为 HY-A1 井压裂作业平台及管柱，图 3 为压力作业曲线，该井 H8b 气藏为高压地层，垂深为 3 964.59 m；地层温度为 151.68 ℃，温度梯度为 3.600 ℃/100 m；地层压力系数为 1.512（58.274 MPa），压力梯度为 5.279 MPa/100 m，最大

主应力为 86.46 MPa,最小主应力为 68.31 MPa,地层压力为 58.27 MPa,弹性模量为 31 300 MPa,泊松比为 0.125(注:来源于 HY-A1 小型压裂分析 DFIT)。通过现场压力数据验证了该模型可靠性,起裂压力计算误差为 4.9%(模拟起裂压力为 61 MPa,实际起裂压力为 58.15 MPa)。



图 1　压裂作业平台

Fig. 1　Fracturing operation platform

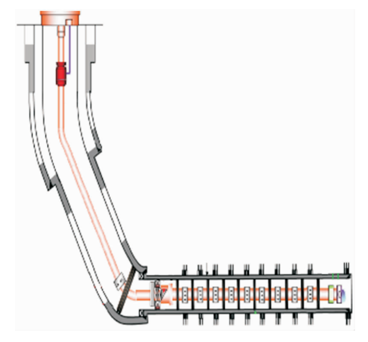


图 2　HY-A1 井压裂管柱

Fig. 2　String of well HY-A1

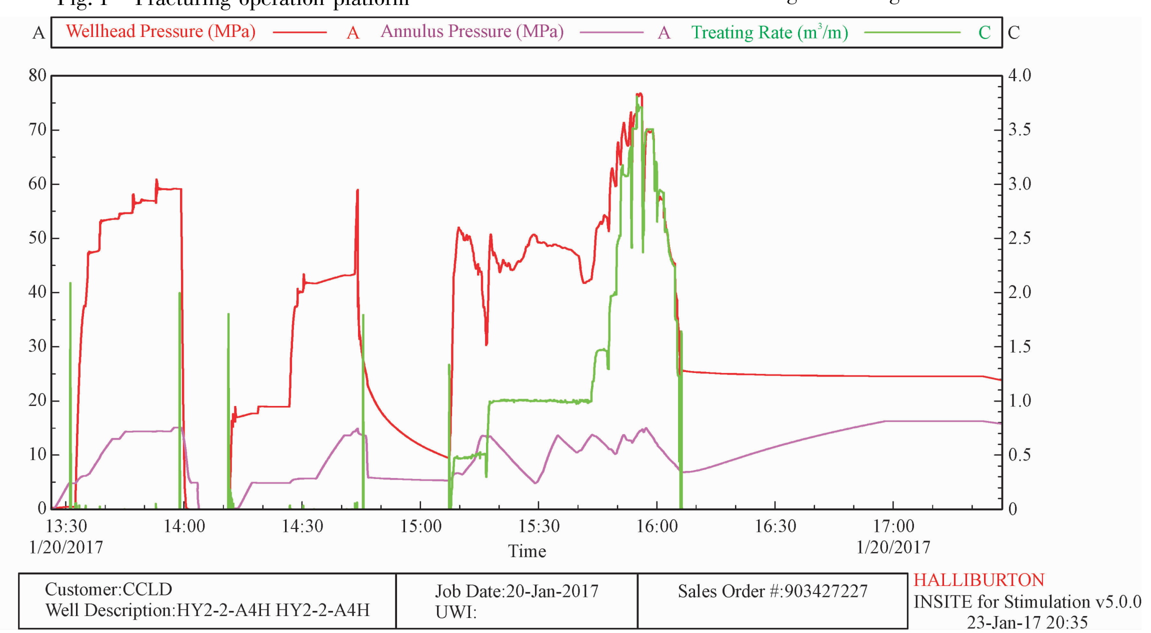


图 3　HY-A1 井压力作业曲线

Fig. 3　Pressure operation curve of HY-A1 well

3　实例分析

以 HY-A1 井 H8b 气藏压裂为例,该气田处于黄岩构造带(春晓、天外天、断桥、残雪等)向东北方向的倾没端,距上海市东南方向约 425 km,距浙江省宁波市约 365 km,主要为浅灰色细砂岩、中砂岩。砂岩类型以岩屑长石砂岩及长石岩屑砂岩为主,其次为长石石英砂岩和岩屑石英砂岩。

H8b 地层最大主应力大小为 2.14 ~ 2.24(82.59 MPa ~ 86.46 MPa),平均最小主应力为 1.77(68.31 MPa),在 H8 层深度的两向应力差在 14.4 MPa ~ 18.3 MPa 之间,应力差较大。原始地层压力 58.274 MPa。H8 地层砂泥岩最小水平主应力差别较大:砂岩平均系数为 1.71(66 MPa),泥岩平均系数为 1.77(70 MPa),平均隔层应力差为 4 MPa。该水平井采用分段多簇射孔、多簇一起压裂方式。射孔设计为 10 段压裂、10 簇射孔,每簇射孔长 1.0 m,选用 4-1/2″射孔枪,16 孔/m,单孔排量为 1.4 bpm(0.22 m^3/m/孔),南北方向与最大水平主应力夹角 95°。实例中 θ 为起裂角,α 为井斜角,Φ 为方位角。

3.1　井斜角对起裂角度影响分析

图 4 示出了 HY-A1 井井斜角对起裂角度的影响。当方位角 <90°时,随井斜角增大,起裂角呈现减小的趋势,当方位角 =90°时,起裂角为 0。根据裂缝的最大周向应力准则,计算得到最大周向应力所对应的裂缝起裂角,再将该起裂角代入方程周向应

力方程,可以计算不同井斜角对应的最大周向应力,井斜角及方位角的优化,对指导钻井井眼的轨迹设计以及压裂射孔设计有较大帮助。

表 1 HY-A1 井岩石力学参数

Tab. 1 Rock mechanics parameters of HY-A1 well

井深/m	密度/(g·cm^{-3})	弹性模量/GPa	泊松比
3 964.86	2.58	31.30	0.19
3 962.76	2.57	34.50	0.15
3 967.9	2.51	29.93	0.25
3 974.2	2.40	30.62	0.23
3 980.4	2.68	31.20	0.25
3 986.9	2.32	32.21	0.23

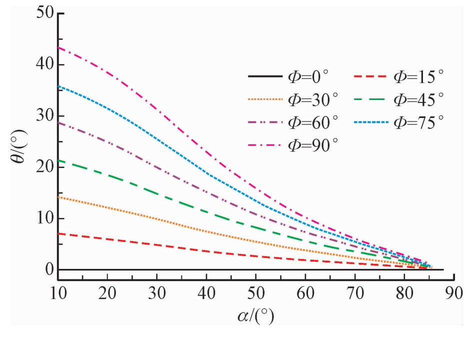


图 4 HY-A1 井井斜角对起裂角度的影响

Fig. 4 The influence of well deviation angle on fracture initiation angle of HY-A1 well

3.2 井斜角对起裂压力影响分析

图 5 示出了 HY-A1 井井斜角对起裂压力的影响。随井斜角度的增大,当方位角 <45°时,起裂压力变化随井斜角的增大并不明显,当方位角 ≥45°时,起裂压力呈现先减小后增大的趋势。水平缝、高走向夹角的裂缝闭合应力越高,裂缝闭合程度越高,渗流能力差,压裂改造时地层难以吸液,起裂压力呈现增高趋势。

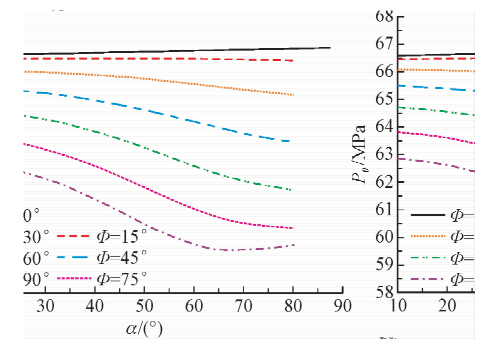


图 5 HY-A1 井井斜角对起裂压力的影响

Fig. 5 The influence of well deviation angle on fracture initiation pressure of HY-A1 well

3.3 方位角对起裂角影响分析

图 6 为 HY-A1 井方位角对起裂角的影响。随井眼方位角的增大起裂角呈现先增大后减小,直至为零,同时,在一定的方位角度上起裂角存在最大峰值,起裂角最大峰值区间的方位角在 60°~80°之间。当压裂裂缝尖端前沿或两侧存在天然裂缝等弱结构时,压裂产生的扰动应力会使天然裂缝面的剪应力增大,会使起裂角变小。

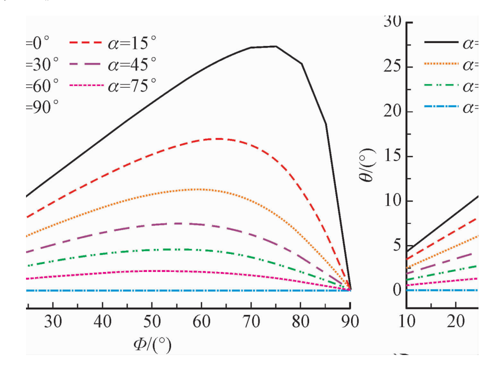


图 6 HY-A1 井方位角对起裂角的影响

Fig. 6 The influence of azimuth on crack initiation angle of HY-A1 well

3.4 方位角对起裂压力影响分析

图 7 为 HY-A1 井方位角对起裂压力的影响。最大周向应力随缝内流体压力的增大而增大,随着方位角的增大,起裂压力总体呈现先减小后增大的趋势,起裂压力存在最低峰值,在本实例中,起裂压力最低峰值在方位角 50°~80°之间,起裂压力最低峰值是井斜角 0°;井斜角 $\alpha=0°$直井段时,方位角 $\Phi=71°$时,最低起裂压力峰值为 58.5 MPa。在压裂设计中,方位角及井斜角尽可能靠近起裂压力最小区域,方位角及井斜角尽可能靠近起裂压力最小区域。

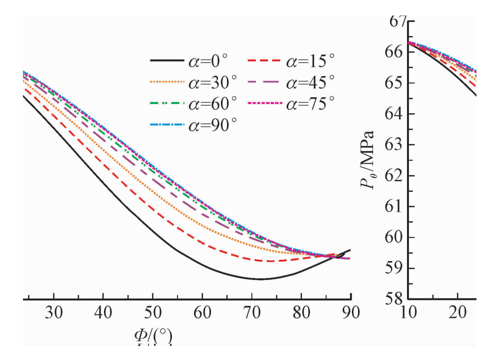


图 7 HY-A1 井方位角对起裂压力的影响

Fig. 7 The influence of azimuth on crack initiation pressure of HY-A1 well

4 结　论

1）建立了东海低渗储层压裂高起裂压力数学模型，验证了 HY-A1 井的起裂压力误差为4.9%，该模型可以用于东海低渗储层压裂设计中，方位角及井斜角尽可能靠近起裂压力最小区域。

2）随井斜角度的增大，当方位角 <45°时，起裂压力变化随井斜角的增大并不明显，当方位角≥45°时，起裂压力呈现先减小后增大的趋势。随着方位角的增大，起裂压力总体呈现先减小后增大的趋势，起裂压力存在最低峰值。

3）随着缝内流体压力的增大，最大周向应力的值增大，应力差值大、泊松比小、异常高压是高起裂压力的关键因素。

参考文献

[1] LAWN B R，EVANS A G. A model for crack initiation in elastic/plastic indentation fields[J]. Journal of materials science，1977，12(11)：2195-2199.

[2] EBERHARDT E，STEAD D，STIMPSON B，et al. Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle roc[J]. Canadian geotechnical journal，1998，35(2)：222-233.

[3] TANAKA K，MURA T. A dislocation model for fatigue crack initiation[J]. Journal of applied mechanics，1981，48(1)：97-103.

[4] 袁志刚. 煤岩体水力压裂裂缝扩展及对瓦斯运移影响研究[D]. 重庆：重庆大学，2014.

[5] 王德强，陈红鸟，马克俭，等. 往复荷载下混凝土断裂力学特性研究[J]. 应用力学学报，2020，37(6)：2317-2324.（WANG Deqiang，CHEN Hongniao，MA Kejian，et al. Investigations on fracture properties of concrete under cyclic loading[J]. Chinese journal of applied mechanics，2020，37(6)：2317-2324(in Chinese)）.

[6] RABCZUK T，BORDAS S，ZI G. A three-dimensional meshfree method for continuous multiple-crack initiation，propagation and junction in statics and dynamics[J]. Computational mechanics，2007，40(3)：473-495.

[7] 师俊平，曹小杉，胡义锋，等. 两相材料界面裂纹的起裂方向及断裂参量研究[J]. 应用力学学报，2014，31(3)：418-422.（SHI Junping，CAO Xiaoshan，HU Yifeng，et al. Study on directions of crack orientation and failure characteristics of bi-material interface crack[J]. Chinese journal of applied mechanics，2014，31(3)：418-422(in Chinese)）.

[8] 郭天魁，张士诚，刘卫来，等. 页岩储层射孔水平井分段压裂的起裂压力[J]. 天然气工业，2013，33(12)：87-93.（GUO Tiankui，ZHANG Shicheng，LIU Weilai，et al. Initiation pressure of staged fracturing for perforated horizontal wells in shale reservoir[J]. Natural gas industry，2013，33 (12)：87-93(in Chinese)）.

[9] 陈方方，张志强，李宁，等. 受压裂纹周边应力极值线及起裂特征研究[J]. 应用力学学报，2017，34(5)：1001-1006.（CHEN Fangfang，ZHANG Zhiqiang，LI Ning，et al. The local extremum stress line of pre-crack under compressive load and induced cracks[J]. Chinese journal of applied mechanics，2017，34(5)：1001-1006(in Chinese)）.

[10] 陈力博，卢川，窦高磊. 酸化压裂技术在油气田开发中的运用[J]. 云南化工，2018，45(6)：196-197.（CHEN Libo，LU Chuan，DOU Gaolei. Application of acid fracturing technology in oil and gas field development[J]. Yunnan chemical industry，2018，45 (6)：196-197(in Chinese)）.

[11] 赵金洲，任岚，胡永全，等. 裂缝性地层水力裂缝张性起裂压力分析[J]. 岩石力学与工程学报，2013，32(增刊 1)：2855-2862.（ZHAO Jinzhou，REN Lan，HU Yongquan，et al. Analysis of hydraulic fracture initiation pressure in fractured formation[J]. Journal of rock mechanics and engineering，2013，32 (S1)：2855-2862(in Chinese)）.

[12] 韩慧芬，孔祥伟. 页岩气储层暂堵转向压裂直井段暂堵球运移特性研究[J]. 应用力学学报，2021，38(1)：249-254.（HAN Huifen，KONG Xiangwei. Study on migration characteristics of plugging balls in shale gas reservoir during plugging to fracturing vertical section[J]. Chinese journal of applied mechanics，2021，38(1)：249-254(in Chinese)）.

[13] NOWELL D，HILLS D A. Crack initiation criteria in fretting fatigue[J]. Wear，1990，136(2)：329-343.

[14] LYKINS C D，MALL S，JAIN V. A shear stress-based parameter for fretting fatigue crack initiation[J]. Fatigue & fracture of engineering materials & structures，2010，24(7)：461-473.

[15] LAUTRIDOU J C，PINEAU A. Crack initiation and stable crack growth resistance in A508 steels in relation to inclusion distribution[J]. Engineering fracture mechanics，1981，15(1)：55-71.

（编辑　张璐）